



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.6.001>

Slit-jet 노즐을 통해 분사되는 초음파 무화 액체연료 화염의 거동

김민철^a · 김민성^b · 김정수^{a,*}

Behavior of the Ultrasonically-atomized Liquid-fuel Flame Injected through a Slit-jet Nozzle

Min Cheol Kim^a · Min Sung Kim^b · Jeong Soo Kim^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

^bAerospace Division, Vitzro Nextech Co., Ltd, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

An experimental study was performed for the behavior of the burner flame which results from burning of the liquid hydrocarbon fuel atomized by an ultrasonic transducer. Configurations of the flame and combustion-field were caught by both high-speed camera and thermo-graphic camera, and those images were analyzed in detail through a image post-processing. As a result, the combustion-field grew and reaction-temperature rose due to the strengthening of combustion reaction with the increasing flow-rate of carrier-gas. In addition, a phenomenon of flame flickering was discussed through the comparative analysis of the variational behavior between the visible flame and IR (Infrared) flame-field. Also, the flickering frequency of the flame was confirmed through FFT (Fast Fourier Transform) analysis employing the flame area.

초 록

초음파 진동자에 의해 미립화된 탄화수소계 액체연료를 분사하는 버너에서 생성되는 화염의 거동을 고찰하기 위한 실험이 수행되었다. 고속카메라와 열화상 카메라를 이용하여 slit-jet 버너에서 생성된 화염과 연소장 이미지를 획득하였으며, 후처리 과정을 통해 화염과 연소장의 구조변이를 면밀히 분석하였다. 그 결과, 수송기체 유량이 증가하면 연소반응이 촉진되어 연소반응영역이 신장되고, 반응온도가 증가하였다. 또한, 시간 변화에 따른 가시화염과 IR 연소장의 거동변화 비교를 통해 화염의 진동원인을 고찰하였으며, 화염면적의 FFT분석을 통해 생성화염의 진동주파수도 확인하였다.

Key Words: Ultrasonic Atomization(초음파 미립화), Hydrocarbon Liquid-fuel(탄화수소계 연료), Slit-jet Flame(Slit-jet 화염), Thermo-graphic Camera(열화상 카메라), Flame Flickering(화염 진동)

Received 25 June 2018 / Revised 26 August 2018 / Accepted 31 August 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

에너지 문제가 심각해지고 있는 현대사회에서 에너지의 효율적인 이용을 위해 다양한 방향으로 연구개발이 진행되고 있다. 그러나 신기술의 확립과 실용화라는 측면에 있어서 아직 많은 시간이 필요하며, 향후 현재 사용되고 있는 석탄과 석유 등과 같은 탄화수소계 연료의 의존율은 크게 변하지 않을 것으로 예상된다[1]. 이러한 상황 하에서 자원의 한계성과 지구환경 오염 문제의 대응책 중 하나로 연소생성물에 대한 규제강화가 행해지고 있으며, 그 규제치는 점차 강화되고 있다.

다양한 연소기술 중 분무연소(spray combustion)는 응답성이 좋고, 고온의 에너지를 얻을 수 있기에 가스터빈, 액체로켓 엔진과 같은 추진기관 뿐만 아니라 열원을 얻는 가정용 보일러까지 폭넓게 사용되고 있다[2-4]. 그러나 분무연소는 액체연료의 미립화, 액적의 분산, 연료증기의 증발 및 공기와의 혼합이라는 많은 소과정이 동시에 진행되면서 연소반응을 일으키기 때문에 그 화염구조는 매우 복잡하며 이들 과정을 제어하는 기초적인 물리현상은 아직 불명확하여 연료의 미립화 및 연소에 관한 계속적인 연구는 필수적이라 할 수 있다[5-7].

1927년 Wood와 Loomis[8]에 의해 초음파를 이용한 미립화 방법이 최초로 소개된 이후, 1962년 초음파 무화에 관한 기본적인 이론이 Lang[9]에 의해 정립되었으며, 그는 초음파에 의한 미립화가 표면장력파(capillary wave)에 의해 생성된다고 주장하였으며, 실험을 통해 그 이론을 뒷받침하였다. 이후 많은 연구자들에 의해 초음파에 의한 액체미립화가 표면장력파 외에도 캐비테이션(cavitation)과 같은 다양한 현상들이 액체의 표면 및 내부에서 복합적으로 작용하여 이루어진다고 주장하였으며, 실험을 통해 이를 입증하였다. 그러나 초음파 미립화과정은 대단히 복잡하고 비정상적(unsteady)이어서 초음파를 이용한 액체 미립화 기구(mechanism)를 규명하기 위한 연구는 아직도 진행 중에 있다[10]. 더욱이 초음파를 이용해 생성한 액체의 액적(droplet)은

크기의 균일도가 높고, 낮은 유속에서도 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 산업, 의학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[11]. 또한, 이류체 노즐(two-fluid nozzle)이나 압력분사 노즐을 이용한 무화 방법에 비해 소음이 적고 액적의 직경 조절이 용이하다는 장점을 가지고 있어 연소장치로의 이용을 위한 연구가 오랫동안 진행되어 왔다[10,12].

초음파를 이용한 액체의 미립화 방법은 직진법(direct vibration method)과 무화법(aerosol method)으로 구별되며 Fig. 1에 간략히 보이고 있다. 직진법은 초음파 진동자 내부에 액체를 통과시켜 진동자의 표면을 따라서 미립화시키는 방법이고, 무화법은 진동자에서 발생한 초음파에너지를 액체에 통과시켜 액체의 표면에서 미립화가 일어나도록 하는 방법이다[7]. 특히, MHz 단위의 주파수를 가진 초음파 진동자를 이용하여 액체연료를 미립화시킬 경우(무화법), 예열과정 없이 즉각적인 연소를 가능케 하는 크기의 액적을 얻을 수 있으며[10], 화학 반응율을 증대시킬 수 있다는 보고[13]에 따라, 본 연구진[14-16]은 액체연료 공급계의 설계기술 고도화를 통한 연소장치개발을 목적으로 2.4 MHz의 진동자를 이용해 액체연료의 미립화 및 분무연소가 가능한 장치를 설계/제작 하였으며, 화염생성 조건과 온도분포에 관한 연구를 진행한 바 있다. 본 연구는 거기에 더하여 slit-jet 버너에서 생성된 화염의 거동을 규명하고, 화염진동 주파수에 대해 고찰하고자 한다.

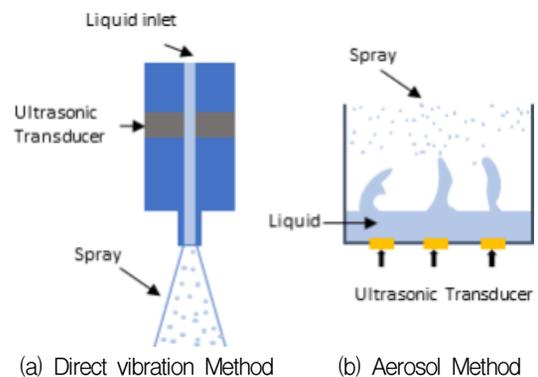


Fig. 1 Ultrasonic atomization method.

Table 1에 정리하였다. 진동자는 18 mm 크기의 압전소자를 이용하여 원형으로 제작되었다. 버너의 노즐부는 PMMA의 내열한계를 고려해 STS304 (Stainless Steel304)로 제작하였다. 노즐부의 크기는 지름 45 mm, 높이 60 mm의 원통형으로 제작하였고, 무화된 연료는 노즐부 상부에 위치한 $30 \times 1.5 \text{ mm}^2$ (중형비 20:1) 크기의 slit을 통해 분사되도록 설계하였으며, 실험에 사용된 버너의 전체적인 형상은 Fig. 4와 같다. 버너 내부에는 열전대와 정압센서(pressure transducer)를 설치하여 액적생성부의 온도 및 압력 변이를 측정하였다. 액적의 분사를 유도하기 위한 수송기체로는 공기(순도 99.999% 이상의 O_2 (20.9%)와 N_2 (79.1%))를 사용하였고, 이를 질량유량제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 통해 수송기체의 공급유량을 정밀하게 제어하였다. 실험에 사용된 액체연료는 등유(kerosene)이다.

버너에서 생성된 화염은 고속 카메라(Vision Research사의 phantom v7.2)를 이용하여 60 FPS (Frame Per Second)의 속도로 이미지를 획득하였으나, 열화상카메라(InfraTec사의 VarioCAM hr)는 장비의 한계로 인하여 10 FPS 속도로 획득하였다. 획득한 이미지들은 matlab을 이용하여 gray scale화 한 후, 고역필터(high-pass filter)를 사용하여 선예도(sharpness)를 증가시켰으며, 이미지 강도(intensity) 조절을 통하여 이진화(binazation)하였다. 그 후, 보정용 이미지(calibration image)와 이진화된 화염 이미지를 비교하여 픽셀(pixel)간 간격을 도출하고, 화염의 단면적을 계산하였으며, 이러한 과정의 순서도를 Fig. 5에 보인다. 획득한 데이터의 평균값을 이용해 고속카메라와 열화상카메라의 촬영속도 차이로 인한 오차율을 최소화시켜 이미지들을 비교하였다.

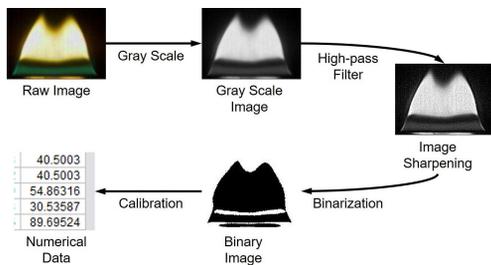


Fig. 5 Flow-chart for image-processing[18].

3. 실험결과 및 고찰

각 실험 조건에서 생성된 대표 화염의 형상을 Fig. 6에 보인다. 수송기체 유량이 증가하면 액적의 분사거리가 늘어남에 따라 화염의 면적이 후류방향으로 신장되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수송기체의 유량이 같더라도 진동자의 소비 전력 증가에 의한 화염의 신장효과를 확인할 수 있는데, 이는 진동자 소비전력의 증가가 연료의

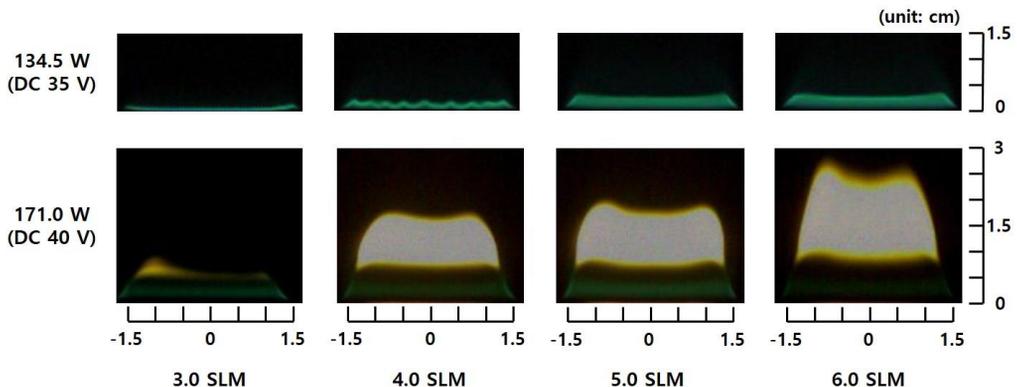


Fig. 6 High-speed camera images of visible flames according to the change of carrier-gas flow-rate and ultrasonic oscillator power.

무화도(degree of atomization)를 증가시켜 유량이 같더라도 무화된 액적의 분사량이 증가하였기 때문이다. 또한, 수송기체유량의 증가를 통한 화염의 크기증가보다 소비 전력 증가에 의한 화염크기 증가가 더 크다는 사실도 관찰된다. 초음

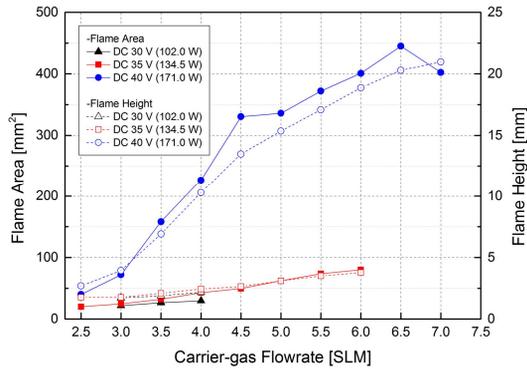


Fig. 7 Variation of flame area and flame height according to the change of carrier-gas flow-rate.

파를 이용한 액체의 미립화는 액체의 점성저항 및 증발도(evaporativity) 향상과 함께 분자의 고리구조 변화와 같은 상태변화를 유발시킨다고 알려져 있는데[10,14-17], 초음파진동자의 소비전력 증가와 동반된 초음파의 진폭증가가 등유분자의 고리구조를 보다 휘발성이 높은 상태로 변이시켜 연소 반응영역을 확장시켰기 때문인 것으로 추론된다.

Fig. 7은 수송가스 유량변화에 따른 화염의 평균면적과 평균 높이의 변화를 보이고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 수송가스의 유량이 크고 초음파 진동자의 소비전력이 클수록 화염의 면적은 넓어지며 화염의 높이도 증가한다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있다. 그러나 소비 전력이 171.0 W이고 수송가스의 유량이 7.0 SLM인 조건에서 화염의 평균높이는 증가하지만 화염의 면적은 6.5 SLM에 비해 오히려 줄어드는 현상을 보이고 있다. 이는 수송가스 유량증가로 인해 분

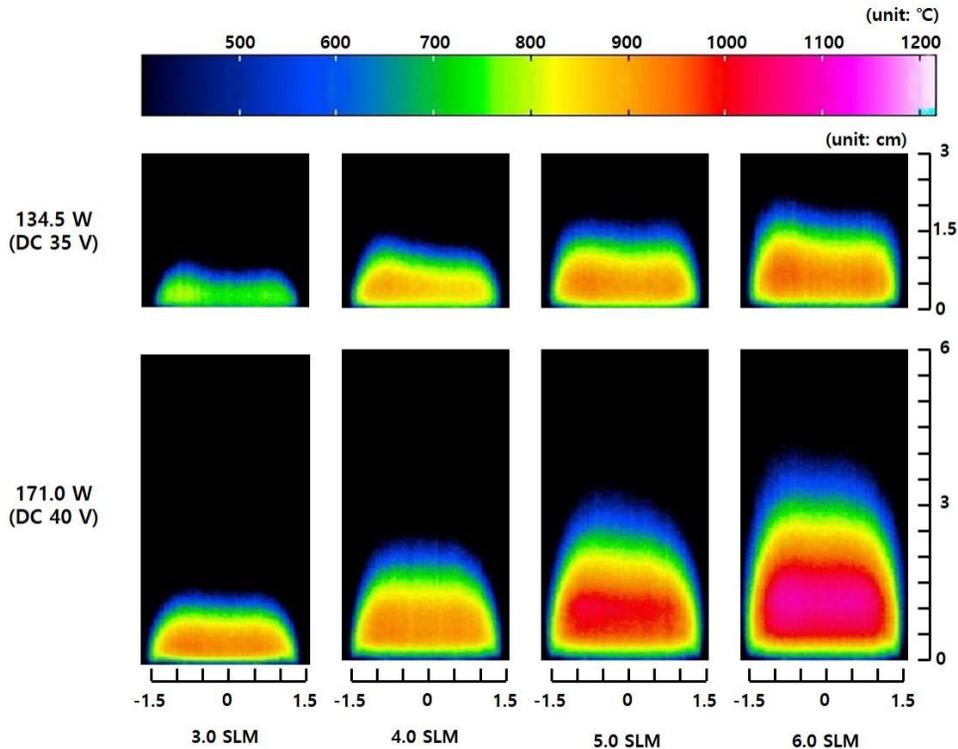


Fig. 8 Thermo-graphic images of combustion according to the change of carrier-gas flow-rate and ultrasonic oscillator power.

사속도가 늘어나 분사거리가 늘어났지만 주변으로 확산되지 못하여, 화염의 높이증가에 반해 그 폭은 오히려 좁아져 나타난 현상으로 판단된다.

열화상 카메라는 피사체의 표면으로부터 복사되는 열에너지를 이용해 온도를 측정하고 이미지화하는 방식이기 때문에[19], 표면을 가지고 있지 않은 화염의 경우, 정확한 온도를 측정하는

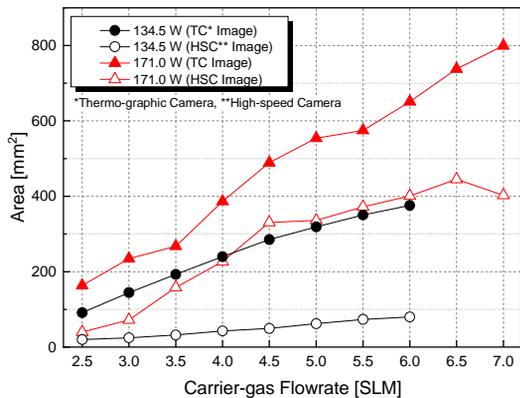
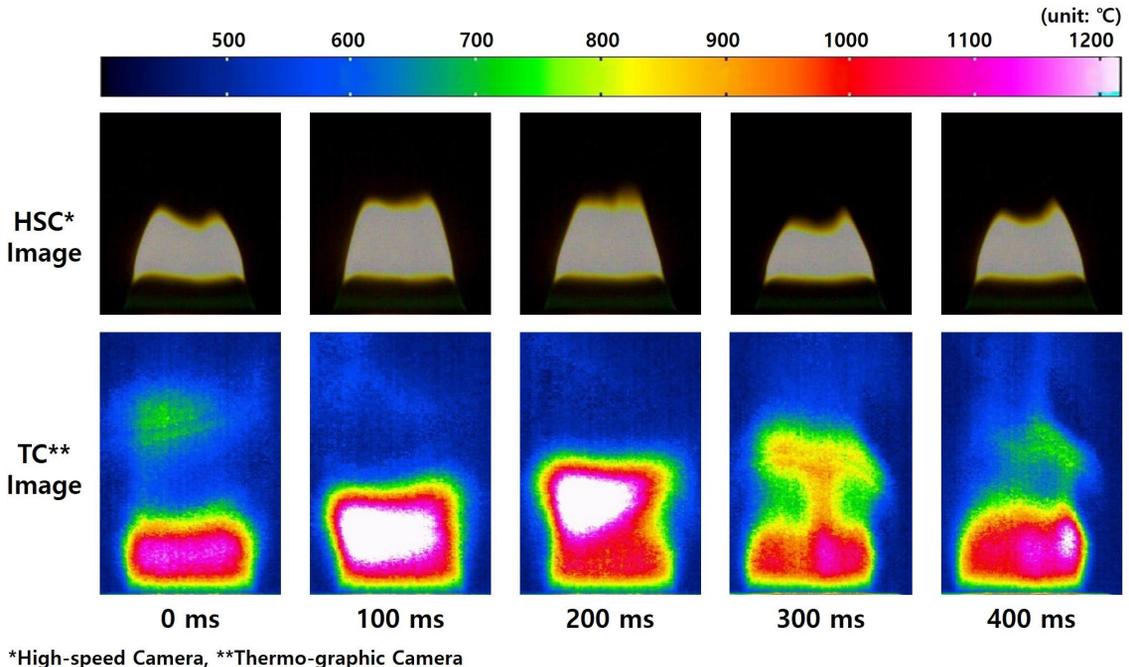


Fig. 9 Variation of flame area according to the flow-rate change of carrier-gas.

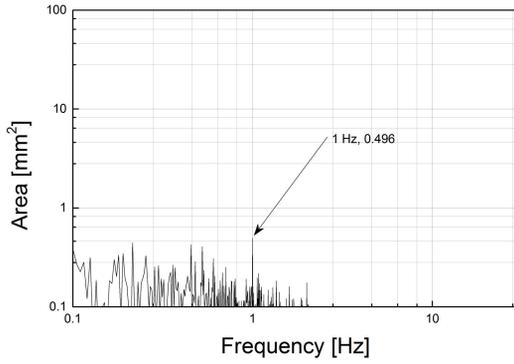
것은 어렵다. 그러나 연소반응의 발열에 의해 나타나는 온도분포 관찰을 통해 연소반응 영역의 크기와 화염온도가 가장 높은 곳의 위치를 가늠할 수는 있다. Fig. 8은 Fig. 6과 동일한 조건에서 열화상카메라를 이용해 연소영역을 20초간 촬영해 획득한 온도데이터들의 평균값을 이용해 후처리한 이미지이다. 열화상 카메라를 이용해 획득한 이미지(Fig. 8)와 고속카메라를 이용해 획득한 이미지(Fig. 6)를 비교할 때, 전자를 통해 획득한 이미지가 확연히 크다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 당연하게도, 연소반응 과정에서 광범위한 열복사 파장대의 에너지가 발산되며, 그중의 일부인 가시파장 영역(visible wavelength range)만이 고속카메라 화상으로 구현되기 때문이다.

Fig. 9는 가연영역 내에서 수송기체와 진동자 소비전력 변화에 따른 가시화염의 평균단면적과 열화상카메라로 획득한 연소영역의 크기 변화를 보이고 있다. 전술한 바와 같이 수송기체의 유량 증가는 가시화염의 단면적뿐만 아니라 연소반응 영역을 확장시킨다는 사실을 재확인할 수 있다.

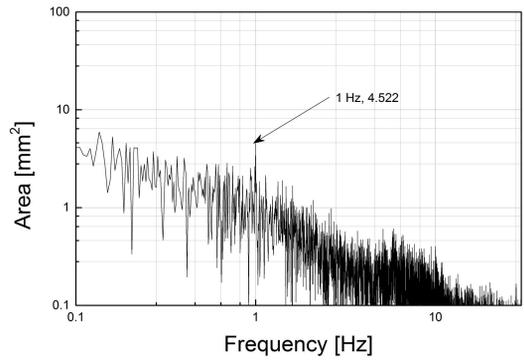


*High-speed Camera, **Thermo-graphic Camera

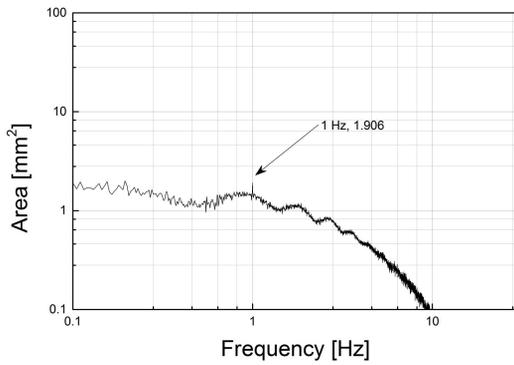
Fig. 10 Sequential images of slit-jet flame (oscillator power: 171.0 W, carrier-gas flow-rate: 6.0 SLM).



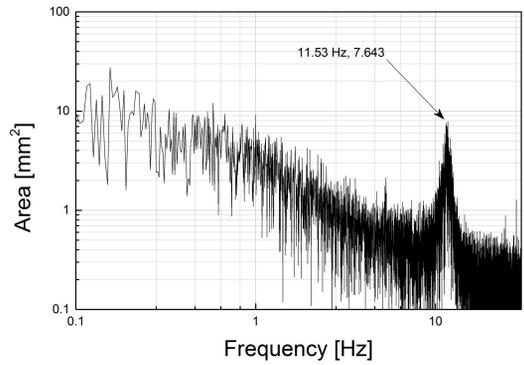
(a) 102.0 W - 3.0 SLM



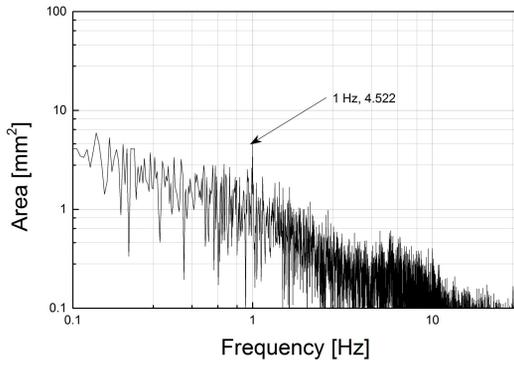
(a) 171.0 W - 3.0 SLM



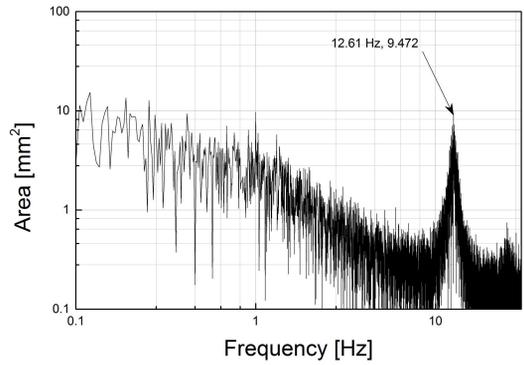
(b) 134.5 W - 3.0 SLM



(b) 171.0 W - 5.0 SLM



(c) 171.0 W - 3.0 SLM



(c) 171.0 W - 7.0 SLM

Fig. 11 FFT results of the flame area according to the power consumption.

Fig. 12 FFT results of the flame area according to the carrier-gas flow-rate.

또한, 수송기체유량의 증가에 의해 연소장과 가시화염의 크기차이가 점점 확대되고 있는데, 이는 화학반응대 크기의 증가가 IR 플룸(plume) 영역의 증대를 동반하기 때문이다.

Fig. 10은 진동자의 소비전력이 171.0 W이고

수송기체의 유량이 6.0 SLM인 조건에서 시간 변화($\Delta t = 100$ ms)에 따른 가시화염형상 및 IR 연소장의 형상변이를 보이고 있다. 확산화염은 열 확산 및 부력에 의해 진동불안정성을 갖게 되는데[20,21]. 본 실험에 의해 생성된 화염도 Fig. 10

과 같이 상하 진동(flame flickering)을 하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 또, 고속 카메라를 이용해 획득한 이미지와 열화상 카메라를 이용해 획득한 이미지 간의 차이가 있음을 관찰할 수 있는데, 고속카메라 이미지에서는 화염이 수직방향으로 신장과 수축을 반복하고 있지만, 열화상카메라 이미지에서는 연소영역이 신장되다 신장율이 한계에 도달하면 연소장 상단의 플룸영역이 분리되고 소멸된 후 다시 신장을 반복한다는 사실을 확인할 수 있다. 이를 통해 가시화염이 위아래로 진동하는 것처럼 보이는 것은 IR 플룸영역이 부력과 열확산에 의해 신장과 소실을 반복하는 과정에서 나타나는 현상이라는 것을 알 수 있다.

진동자 소비전력과 수송기체의 유량을 변화시키면서 생성되는 화염의 단면적변화에 대한 FFT 분석결과를 Fig. 11, 12에 도시한다. 화염진동은 앞서 설명한 부력과 열확산 외에도 열손실과 열 및 물질전달률의 차이, 복사열 손실 등 다양한 현상에 의해 나타나며 확산화염을 이해하는데 있어 매우 중요한 특성 중 하나이다. 확산화염의 경우 일반적으로 10 Hz 이하의 저 주파수로 진동하며, 부상화염일 경우 0.25 Hz 미만의 저주파 진동도 나타난다고 보고된 바 있다[20]. Fig. 11, 12를 통해 본 실험조건에서 생성된 화염도 대부분 10 Hz 내외, 혹은 그 화염진동 주파수를 가지고 있다는 것이 확인되며, 주파수가 높아질수록 면적의 변화는 미미해지고 있다는 사실이 확인된다. 수송가스의 유량이 동일한 경우(Fig. 11) 1 Hz에서 진동자 소비전력의 변이에 관계없이 화염의 크기변화가 상대적으로 크다는 것이 발견된다. 이를 통해 본 실험에 의해 생성된 화염은 1 Hz 주기로 상하 진동을 크게 한다는 사실을 유추할 수 있으며, 그 화염의 진동주기는 진동자의 소비 전력과 무관하다는 사실 또 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12에서와 같이 진동자의 소비전력이 같더라도 수송가스의 유량이 커지면 10 Hz 이상의 주파수에서 화염영역이 확대되는 주파수가 추가로 발견되는데, 이를 통해 본 실험에서 생성된 화염의 자기진동은 진동자의 진폭보다 수송가스 유량에 의한 영향이 크다는 사실

을 알 수 있다. 요약하면, 수송가스의 유량변이를 통한 화염 자기진동의 생성과 그 진동주파수의 변이 등과 같은 화염진동의 능동적 제어 가능성이 본 연구를 통하여 확인될 수 있었다.

4. 결 론

조음과 진동자를 이용해 생성한 탄화수소계 액체연료분무를 분사하는 슬릿젯버너의 화염동특성을 고찰하기 위한 실험이 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진동자가 소비하는 전력이 크고, 수송기체의 유량이 많을수록 화염의 면적이 증가하였으며, 수송기체의 유량보다는 진동자 소비전력의 영향이 더 크다는 사실을 확인하였다.
2. 가시화염과 연소장 IR 이미지를 비교분석한 결과, 연소영역 중 일부 파장의 영역만이 가시화 된다는 사실을 확인하였다.
3. 본 실험에서 생성된 화염은 진동특성을 갖는데, 이는 IR 플룸 영역을 포함하는 연소장이 부력과 열확산의 영향을 받아 신장과 소실을 반복하면서 나타나는 현상임을 확인하였다.
4. 실험에 의해 생성된 화염은 전형적인 확산화염과 같이 10 Hz 이하의 주파수 영역에서 자기진동특성을 보였다.
5. 화염은 진동자의 소비전력과 관계없이 1 Hz의 속도로 크게 위아래로 진동하였으며, 수송기체의 유량 증가에 의해 10 Hz 이상의 속도에서도 화염이 진동한다는 사실을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 논문은 교육부와 과학기술정보통신부의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B01012622)과 우주핵심기술개발사업(NRF-2016M1A3A3A02018009)의 연구결과임.

References

- Hwang, S.M., "Evolution of Combustion Mechanism of Droplet Cluster in Premixed Spray Flame by Simultaneous Time-Series Measurement," *Korea Society of Environmental Engineers*, Vol. 31, No. 6, pp. 442-448, Russia, 2009.
- Zeldovich, Y.B., Sadovnikov, P.Y. and Frank-Kameneski, D.A., *Oxidation of Nitrogen in Combustion*, Publishing House of the Acad of Sciences of USSR, Moscow, Russia, 1947.
- Lavoie, G.A., Heywood, J.B. and Keck, J.C., "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines," *Combust. Sci. Technol.*, Vol. 1, Issue 4, pp. 313-326, 1970.
- Heywood, J.B., Fay, J.A. and Linden, L.H., "Jet Aircraft air Pollutant Production and Dispersion," *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 70-115, pp1971.
- Lefebvre, A.H., *Atomization and Spray* 2nd edition, CRP Press. Boca Raton, F.L., U.S.A., Ch.1, 1988.
- Lee, S.Y., *Liquid Atomization*, Minumsa, Seoul, Korea, 1996.
- Ju, E.S., La, W.J. and Choi, W.C., "A Study on Characteristics of the Liquid Atomization by Ultrasonic," *Trans. Korea Soc. Auto. Eng.*, Vol. 7, No. 5, pp. 31-39, 1999.
- Wood, R.W. and Loomis, A.L., "The Physical and Biological Effects of High-frequency Sound-Waves of Great Intensity," *Philosophical Magazine*, Vol. 4, Issue 22, pp. 417-436, 1927.
- Lang, R.J., "Ultrasonic Atomization of Liquid," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, No. 1, pp. 6-8, 1962.
- Takuya, F., Yasuki, H., Noriyuki, K., Masanobu, H. and Yoshio, T., "Characteristics of Low Vapor Pressure Oil Ignition Developed with Irradiation of Mega Hertz Level Ultrasonic," *Fuel*, Vol. 83, Issue 16, pp. 2205-2215, 2004.
- Topp, M.N. and Eisenklam, P., "Industrial and Medical Uses of Ultrasonic Atomizers," *Ultrasonic*, Vol. 10, Issue 3, pp. 127-133, 1972.
- Hwang, S.H., "Distribution Characteristics of Fuel Drop Size and Flame Temperature with Different Bluff Body Shapes," M.S Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea, 2001.
- Yano, Y.F., Matsuura, K., Fukazu, T., Abe, F., Wakisaka, A., Kobara, H., Kumagai, A., Katsuya, Y. and Tanaka, M., "Small-angle x-ray scattering measurement of a mist of ethanol nanodroplets: An approach to understanding ultrasonic separation of ethanol-water mixtures," *J. Chem. Phys.*, Vol 127, No.3, 031101, 2007.
- Kim, M.S., and Kim, J.S., "Combustion Characteristics of the Atomized Hydrocarbon Liquid-fuel Spray Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol 20, No 1, pp. 43-49, 2016.
- Kim, M.S., Bae, D.S. and Kim, J.S., "Effects of the Carrier-gas Flow-rate on the Combustion Characteristics of the Ultrasonically-atomized Slit-jet Flame," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol 20, No 3, pp. 9-16, 2016.
- Kim, M.S., Koo, J.Y., Kim, H.D. and Kim, J.S., "Visualization of the Combustion-field in Ultrasonically-atomized Slit-jet Flame Using a Thermo-graphic Camera," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol 20, No 4, pp. 1-8, 2016.

17. Ryu, J.I., "Atomization Technology of Liquid Fuels," *Auto Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 61-68, 1993.
18. Kim, M.S., Kim, J.S., "Flame Formation of Ultrasonically-atomized Liquid-fuel Injected through a Slit-jet Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers* Vol. 21, No. 1, pp. 17-25, 2017.
19. Choi, W.Y. and Kwon, S.J., "An Investigation on Combustion Characteristics of Hydrogen-Air Premixture in a Sub-millimeter Scale Catalytic Combustor using Infrared Thermography," *The Korean Society of Combustion*, Vol. 10, No. 3, pp. 17-24, 2005.
20. Yoon, S.H., Park, J., Kwon, O.B. and Bae, D.S., "Study of Characteristics of Self-excitation in Lifted Laminar Free-jet Propane flames Diluted with Nitrogen," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 4, pp. 399-408, 2010.
21. Manikantachari, K.R.V., Raghavan, V.. and Srinivasan, K., "Natural Flickering of Methan Diffusion Flames," *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 11, pp. 2423-2428, 2011.